



Исследование вопросов развития координатного обеспечения

И.В. Гусев¹, А.М. Голубицкий¹, В.Б. Непоклонов^{2,3}✉

¹ Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,
Королёв, Россия

² Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,
Москва, Россия

✉ vbnep@miigaik.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Гусев И.В., Голубицкий А.М., Непоклонов В.Б. Исследование вопросов развития координатного обеспечения // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 22–43. DOI:10.30533/GiA-2025-049.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА космический геодезический комплекс, координатное обеспечение, геоцентрическая система координат, ГНСС, МСВЗ, GENESIS, GGOS, GGRF, ITRF, ITRS

АННОТАЦИЯ Целью работы является выявление перспективных направлений развития координатного обеспечения как основы устойчивого социально-экономического развития. С позиций системного анализа исследованы технологические аспекты установления, поддержания, развития и распространения общеземной геоцентрической системы координат (ОГСК). Рассмотрены различные реализации ОГСК, включая первичные реализации на базе сети ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame), альтернативные решения, полученные ведущими зарубежными центрами, реализации на базе станций Международной службы ГНСС и реализации на основе орбитального подхода. Проведенный анализ учитывал текущее состояние отечественной космической геодезии и ее использование в интересах координатного обеспечения. В качестве основных достижений отмечено, что в СССР и РФ за это время при помощи космических геодезических комплексов «Геоид» и «ГЕО-ИК» были созданы ОГСК «Параметры Земли 1977, 1985 и 1990 годов». На сегодняшний день перспективы развития ОГСК связаны с установлением качественно новой общеземной геодезической системы координат, включающей геометрическую и физическую отсчетные основы; запуском спутника GENESIS, который будет реализовывать принцип колокации нескольких типов измерений в космосе; достижением беспрецедентного миллиметрового уровня точности в определении координат и скоростей опорных пунктов, который задан в проекте GGOS.

1 Введение

Система координат служит основой для решения социально-экономических, научных и военных задач, а вопросы ее установления, поддержания и развития издавна являются предметом геодезической науки. Под системой координат понимают набор математических правил, описывающих, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства¹, а ее практической реализацией является геодезическая отсчетная основа, закрепляемая пунктами геодезической сети на земной поверхности с соответствующими значениями координат² и скоростей их годовых движений. Современные реализации систем координат включают также модели движения координат опорных пунктов, их временные ряды и параметры связи с другими системами.

Идеальная земная система координат (ЗСК) определяется как трехмерная в математическом смысле система координат, связанная с Землей и вращающаяся вместе с ней. В ньютоновском смысле физическое пространство рассматривается как евклидово аффинное трехмерное пространство, что предполагает выбор в качестве его модели аффинной системы координат [1]. Идеальная геоцентрическая ЗСК должна иметь свое начало в центре масс Земли, а ее главная плоскость должна совпадать с плоскостью земного экватора. Ось X направлена в нулевой (Гринвичский) меридиан, ось Z — в полюс Земли, ось Y дополняет систему до правой. Ее три ортогональные декартовы оси должны быть фиксированными в теле вращающейся Земли при условии отсутствия вращения системы координат в теле самой Земли (условие No-Net-Rotation), вызванного тектоникой литосферных плит, а масштаб должен быть согласован со всемирно принятыми мерами длины, установленными в соглашениях системы единиц СИ [1, 2].

Под координатным обеспечением понимается комплекс согласованных организационно-технических мероприятий, направленных на установление, поддержание, развитие и распространение заданной системы координат, а также определение параметров ее связи с другими системами. Координатное обеспечение, высотное и гравиметрическое образуют систему геодезического обеспечения страны [3]. Данную систему можно трактовать как «совокупность взаимодействующих технических, технологических и информационных компонентов для достижения определенных целей, связанных с удовлетворением потребностей различных органов управления, а также юридических и физических лиц с необходимыми для них геодезическими данными и продуктами их переработки в соответствии с установленными требованиями к составу, точности, полноте, подробности и актуальности данной системы» [4, с. 7–8].

Сегодня координатное обеспечение потребителей осуществляется как традиционными геодезическими методами измерений, так и с использованием глобальных (ГНСС) и региональных навигационных спутниковых систем (РНСС) (в настоящее время функционируют четыре ГНСС: GPS [США], ГЛОНАСС [РФ], Galileo [ЕС], BDS [КНР] — и две РНСС: QZSS [Япония] и NavIC [Индия]). В первом случае для определения координат используется геодезическая отсчетная основа, а во втором — бортовые эфемериды³ навигационных космических аппаратов (НКА), передаваемые в составе навигационного сообщения.

При этом развитие координатного обеспечения нашей страны, важность которого обуславливается потребностями научного, социально-экономического и оборонного характера, сталкивается с необходимостью, с одной стороны, согласования государственных систем координат с общепринятой в качестве

1 ISO 19111-2019. Geographic information – Referencing by coordinates / International Organization for Standardization, 2019. 143 p.

2 ГОСТ Р 52572-2006. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2006. 11 с.

3 ГОСТ Р 52928-2010. Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 11 с.

эталона Международной земной системой координат (МЗСК), с другой — обеспечения независимости и самодостаточности государственных систем координат. Другим вопросом является эффективность доведения системы координат до потребителя, что требует достаточной плотности размещения опорных пунктов на территории страны, площадь которой составляет более 17 млн км², в случае применения традиционных методов либо наличия высокоточных бортовых эфемерид НКА при использовании ГНСС. Все это требует развития качественной национальной геодезической инфраструктуры, которая является фундаментом системы геодезического обеспечения страны.

2 Материалы и методы

Суть данной работы заключается в системном анализе технологических аспектов установления, поддержания, развития и распространения общеземной геоцентрической системы координат (ОГСК) как основы устойчивого социально-экономического развития с целью выявления перспективных направлений развития координатного обеспечения как составной части системы геодезического обеспечения страны.

Поскольку общественно-экономические процессы становятся все более зависимыми от сложных технологий и управления пространством, в котором они осуществляются, за последние два десятилетия наблюдается значительный рост потребности в точном местопределении и качественных геопространственных данных. Это требует создания бесшовной картографической основы, развития навигационных технологий и внедрения единой координатной основы, что укладывается в концепцию создания единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения и инфраструктуры пространственных данных, действующая редакция которой в настоящее время в нашей стране отсутствует. Вместе с тем реализация нескольких государственных программ за последние два десятилетия позволила в значительной степени ликвидировать отставание нашей страны по уровню развития координатного обеспечения от ведущих мировых держав. Российская Федерация в соответствии со своими национальными интересами продолжает наращивать сеть измерительных комплексов с учетом международных рекомендаций. За 2022–2023 годы количество постоянно действующих пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети увеличилось более чем в два раза, а их количество достигло 101 единицы, в том числе 12 пунктов дублированы. В результате территория страны покрыта равномерной сетью постоянно действующих пунктов ГНСС-наблюдений. Продолжается модернизация отечественной радиоинтерферометрической сети телескопов «Квазар-КВО». На пунктах Зеленчукская, Бадары, Светлое установлены современные быстроповоротные радиотелескопы РТ-13⁴. Каждый пункт сети «Квазар-КВО» является пунктом колокации, который предоставляет свои измерения в Международную службу вращения земли и систем отсчета (МСВЗ) и оснащен аппаратурой ГНСС, квантово-оптической системой (КОС), а пункт Бадары в дополнение оборудован радиомаяком доплеровской системы DORIS (*англ.* Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). К 2030 году на базе Уссурийской астрофизической обсерватории в составе сети «Квазар-КВО» планируется ввести в эксплуатацию четвертый пункт колокации, оборудованный радиотелескопом РТ-13 и аппаратурой ГНСС и КОС. Ведутся работы по оснащению пунктов сети «Квазар-КВО» новым поколением КОС «Точка». Отечественная сеть лазерной локации спутников (ЛЛС) насчитывает 11 станций КОС (восемь

4 Введен в эксплуатацию радиотелескоп нового поколения РТ-13 // Министерство науки и высшего образования РФ: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/26501/> (дата обращения: 11.05.2025).

на территории РФ и три за ее пределами), на которых установлены преимущественно КОС «Сажень-ТМ» [5, 6]. Полностью развернута система ГЛОНАСС, орбитальная группировка которой пополняется навигационными аппаратами нового поколения. Продолжается размещение станций мониторинга системы ГЛОНАСС за рубежом. Функционирует космическая геодезическая система «ГЕО-ИК-2», в составе которой два космических аппарата.

Вышеперечисленные мероприятия не раскрывают полный перечень проводимых в государстве работ. Этот список можно дополнить, например, разработкой отечественного программного обеспечения по обработке и анализу геодезических измерений или успехами в области создания атомных стандартов частоты и поддержания национальной шкалы времени и пр., однако это выходит за рамки данной статьи.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Установление общеземной геоцентрической системы координат

Запуск первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) 4 октября 1957 года положил начало космической геодезии^{5,6}. Обработка фотографических наблюдений первых ИСЗ позволила уточнить сжатие Земли⁷ и значения первых зональных гармоник, характеризующие ее внешнее гравитационное поле⁸. А с развитием методов космической триангуляции впервые удалось связать различные континенты и острова в единой системе координат.

Во второй половине 1950-х годов в Смитсоновской астрофизической обсерватории (*англ.* Smithsonian Astrophysical Observatory, SAO) начала разрабатываться Программа по наблюдению ИСЗ (*англ.* Satellite Tracking Program, STP), которая выполнялась до 1983 года и имела две фазы^{9,10,11}. В ее начале с использованием фотокамер Бейкера — Нанна (ФБН) выполнялись фотографические наблюдения и впервые (в 1959 году) была создана глобальная сеть из 12 станций¹² [7]. В 1961 году погрешность определения положения этих станций¹³ составляла ~ 100–150 м, но уже в 1966 году в модели «Стандартная Земля» они были определены¹⁴ с погреш-

5 Баранов В.Н., Бойко Е.Г., Краснорылов И.И. и др. Космическая геодезия: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 407 с.

6 Изотов А.А., Зубинский В.И., Макаренко Н.Л. и др. Основы спутниковой геодезии. М.: Недра, 1974. 320 с.

7 King-Hele D.G., Merson R.H. A new value for the Earth's flattening, derived from measurements of satellite orbits // *Nature*. 1959. Vol. 183. P. 881–882.

8 King-Hele D.G. The Earth's gravitational potential, deduced from the orbits of artificial satellites // *Geophysical Journal International*. 1961. Vol. 4. P. 3–16.

9 Lundquist C.A. Evolution of optical satellite tracking. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019_Lundquist_presentation.pdf (дата обращения: 16.04.2025).

10 Satellite Tracking Station Records / Smithsonian Astrophysical Observatory. Satellite Tracking Program, 1953–1968. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://siarchives.si.edu/collections/siris_arc_216832 (дата обращения: 16.04.2025).

11 SAO Loses Satellite-tracking Contract. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://siarchives.si.edu/collections/siris_sic_2175 (дата обращения: 16.04.2025).

12 Бойко Е.Г., Кленицкий Б.М., Ландис И.М. и др. Использование искусственных спутников Земли для построения геодезических сетей. М.: Недра, 1977. 376 с.

13 Veis G. The positions of the Baker-Nunn camera stations // *Research in Space Science*. SAO Special Report. 1961. No. 59. 5 p.

14 National Geodetic Satellite Program. Part 2. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 499 p.

ностью 10–20 м. С развитием квантово-оптических систем в 70-х годах XX века и вследствие недостаточной точности оптических наблюдений приоритет начал переходить к лазерной локации спутников¹⁵. К концу второй фазы сеть станций наблюдений состояла из шести колоцированных пунктов (КОС и ФБН), четырех фотографических (ФБН) и одной лазерной станции (КОС)^{16,17}. Погрешность геоцентрического положения пунктов¹⁷ не превышала 10 м. В этой программе, помимо США, принимали участие Франция, Греция и Япония^{16,17}.

В СССР подобные работы начались в 1956 году с выходом постановления Правительства СССР, согласно которому на Академию наук СССР были возложены обязанности по созданию сети наблюдений ИСЗ и организации их наблюдений. В результате уже к октябрю 1957 года на территории СССР были развернуты 66 станций, а несколько десятков станций — за границей СССР. В конце 1963 года Министерством обороны СССР были инициированы работы по созданию общеземной геодезической сети в единой советской системе координат по наблюдениям ИСЗ и уточнению геофизических параметров Земли в интересах топогеодезического обеспечения РВСН [8]. Для этих целей были созданы космические геодезические комплексы (КГК) «Геоид» и «ГЕО-ИК». В результате опытной эксплуатации КГК «Геоид» (1972–1977) было выполнено определение пунктов космической геодезической сети (КГС) в ОГСК «Параметры Земли 1977 года» с точностью, характеризующейся погрешностью положения пунктов 20–25 м в среднем по Земле и 13 м — на территории страны [9]. По итогам летных испытаний КГК «ГЕО-ИК» (1982–1983) и совместной обработки данных обоих комплексов была выведена ОГСК «Параметры Земли 1985 года» с погрешностью положения пунктов КГС на территории страны 5 м и 10–15 м для других территорий [9]. По наблюдениям КГК «ГЕО-ИК» за 1985–1989 годы положение пунктов КГС в ОГСК было определено с абсолютной погрешностью 2–3 м, а также были обеспечены требования к точности взаимного положения пунктов наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС не хуже 0,5 м [9]. В 1992 году была принята ОГСК «Параметры Земли 1990 года», также полученная по данным КГК «ГЕО-ИК» [9]. Погрешность геоцентрического положения пунктов КГС в ней¹⁸ составляла 2 м. Обработка полного набора данных КГК «ГЕО-ИК» была завершена к 1999 году, а погрешность абсолютного положения пунктов КГС не превышала 0,7 м. Эти данные затем использовались в модернизированной версии ОГСК «Параметры Земли 1990 года»¹⁹ — ПЗ-90.02 [9]. Погрешность определения абсолютного положения пунктов в системе ПЗ-90.02 оценивалась в диапазоне 0,3–0,5 м [10].

С 1964 по 1977 год Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, NASA) провело Национальную геодезическую спутниковую программу (*англ.* National Geodetic Satellite Program, NGSP), которая первоначально была нацелена на уточнение геодезических и геофизических параметров, используемых при расчете орбит ИСЗ^{17,20}. Для этого предстояло решить три задачи: определить точные координаты систем слежения, уточнить модель гравитационного поля Земли и выполнить взаимные сравнения и калибровку различных систем

15 Pearlman M.R. Early experience of the SAO Satellite-Tracking Program // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1983. Vol. 64. No. 25. P. 417–418.

16 Lundquist C.A. Evolution of optical satellite tracking. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019_Lundquist_presentation.pdf (дата обращения: 16.04.2025).

17 National Geodetic Satellite Program. Part 2. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 499 p.

18 Галазин В.Ф., Каплан Б.Л., Лебедев М.Г. и др. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90): справочный документ / под ред. В.В. Хвостова. М.: КНИЦ, 1998. 38 с.

19 Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.02): параметры общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли. М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2006. 60 с.

20 National Geodetic Satellite Program. Part 1. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 527 p.

слежения^{21,22}. В рамках решения первой задачи требовалось установить достаточное количество опорных пунктов с погрешностью их местоопределения ± 10 м для связи региональных систем координат в единой глобальной системе^{21,22}. В процессе реализации программы использовались фотографические, радиодальномерные, доплеровские, лазерные и фазовые дальномерные измерения²³. Наблюдения выполнялись на базе обширной глобальной сети из более 260 станций, принадлежащих шести основным организациям — участницам программы. Колоцирование нескольких техник осуществлялось на ~60 пунктах²³. В результате были определены координаты этих пунктов в североамериканской, европейской, южноамериканской, токийской и австралийской геодезических системах координат, а погрешности в связях между этими системами были уменьшены²¹ не менее чем на 50 %. Участниками программы были получены по меньшей мере семь независимых координатных решений, а погрешность абсолютного положения станций^{21,23}, как правило, оценивалась в диапазоне от 2 до 10 м.

В 1971 году французским Национальным центром космических исследований (*фр.* Centre National d'Études Spatiales, CNES) был инициирован первый Международный эксперимент по спутниковой геодезии (*англ.* International Satellite Geodesy Experiment, ISAGEX), в котором приняли участие США, СССР и Чехословакия^{24,25,26}. Эксперимент заключался в проведении лазерно-фотографической кампании наблюдений ИСЗ, оснащенных лазерными уголковыми отражателями²⁵. В результате эксперимента были определены 14 орбитальных дуг^{24,27}, которые затем использовались в качестве дополнительных данных для создания глобальной модели Земли — «Стандартная Земля III» [11]. По фотографическим наблюдениям специалисты Смитсоновской обсерватории также определили координаты 13 станций, участвовавших в эксперименте, погрешность абсолютного положения которых составила²⁸ 10–20 м. Сотрудники Центра космических полетов им. Годдарда по лазерным и фотографическим наблюдениям оценили координаты других наборов пунктов, участвовавших в эксперименте, с погрешностью ~20 м по каждой координатной оси^{25,29}.

На рубеже 70–80-х годов XX века стало очевидно, что актуальная на то время концепция земных систем координат изжила себя и не отвечала перспективным требованиям потребителей. Участники 56-го коллоквиума Международного астрономического союза (МАС) по использованию опорных систем координат для изучения динамики Земли (Варшава, 1980) рекомендовали создать новую рабочую группу для выработки предложений по установлению и поддержанию новой единой земной системы координат, основанной на новых методах космической геодезии³⁰. К тому времени широкое применение получили методы

-
- 21 National Geodetic Satellite Program. Part 2. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 499 p.
 - 22 Rosenberg J.D. Objectives of the NGSP // Proceedings of the GEOS Program Review Meeting. 1968. No. 1. P. 19.
 - 23 National Geodetic Satellite Program. Part 1. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 527 p.
 - 24 Георгиев Н.И., Масевич А.Г., Клеицкий Б.М. и др. Использование оптических наблюдений искусственных спутников Земли для геодезии. София: Изд-во Болгарской Академии наук, 1979. 276 с.
 - 25 Marsh J.G., Douglas B.C., Klosko S.M. Analyses for precision reduced optical observations from the international satellite geodesy experiment (ISAGEX). Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 1973. 18 p.
 - 26 Kovalevsky J. Results of the "ISAGEX" campaign // Space Research XV. Proceedings of Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences of the 17th Plenary Meeting of COSPAR. Berlin: Akademie-Verlag, 1975. P. 3–15.
 - 27 Баранов В.Н., Бойко Е.Г., Краснорылов И.И. и др. Космическая геодезия: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 407 с.
 - 28 Gaposchkin E.M., Latimer J., Mendes G. Station coordinates in the standard earth 3 system and radiation-pressure perturbations from ISAGEX camera data. Cambridge: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1975. 50 p.
 - 29 Marsh J.G., Douglas B.C., Walls D.M. Geodetic results from ISAGEX data // Bulletin Géodésique. 1974. Vol. 116. P. 117–130.
 - 30 Wilkins G.A., Mueller I.I. Joint summary report of the IAU/IUGG working groups on the rotation of the Earth and the terrestrial reference system // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 771–788.

ЛЛС, лазерной локации Луны (ЛЛЛ)³¹, радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) [12]. Для военных целей в 1964 году в США [13] и в 1967 году в СССР³² были созданы доплеровские навигационные системы первого поколения TRANSIT и «Циклон» (позже «Цикада»), соответственно, началось развертывание ГНСС второго поколения — GPS (*англ.* Global Positioning System) в 1978 году и ГЛОНАСС в 1982 году³³. Такой арсенал измерительных средств позволял решать задачи координатного обеспечения поистине в глобальном масштабе. Так, в результате эксплуатации системы TRANSIT была создана система координат World Geodetic System 1972 (WGS 72) с погрешностью определения координатной основы в диапазоне 1–2 м, а доплеровские наблюдения на пунктах ее сети TRANET впервые были использованы для целей геодинамики.

В период с 1978 по 1988 год совместной рабочей группой МАС и Международного союза геодезии и геофизики (МСГГ) по изучению вращения Земли был организован проект MERIT (*англ.* Monitor Earth-Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis), цель которого — мониторинг вращения Земли и взаимное сравнение методов его наблюдения и анализа³⁴ [14]. В 1980 году была учреждена рабочая группа по установлению единой земной системы координат COTES (*англ.* Conventional Terrestrial Reference System Working Group) в качестве вклада Международной ассоциации геодезии (МАГ) в проект MERIT³⁴ [15]. В рабочей группе COTES участвовали США, Франция, Бельгия, Япония и Польша, а в MERIT — Великобритания, США, Франция, Германия, Бельгия, Португалия, Нидерланды, СССР, КНР, Япония, Австралия³⁴. Благодаря кооперации этих рабочих групп в 1981 году задачи проекта MERIT³⁵ были дополнены созданием новой общепринятой земной системы координат [14]. Совместная работа обеих групп позволила выполнить несколько кампаний наблюдений и их анализа³⁴. Координационным центром проекта выступало Международное бюро времени (*фр.* Bureau International de l'Heure, ВИН), которое в 1985–1988 годах получило решения первых четырех международных систем координат ВТС (*англ.* ВИТ Terrestrial System): ВТС84, ВТС85, ВТС86 и ВТС87 [15]. Для этого использовались РСДБ, ЛЛС, ЛЛЛ и доплеровские наблюдения³⁶. Погрешность относительного положения пунктов в проекте MERIT составляла³⁷ менее 0,1 м.

До появления MERIT-COTES в качестве земной системы координат использовалась геоцентрическая система СИО/ВИН, ориентация которой задавалась по астрономическим координатам сети астрономических приборов, используемых Международной службой движения полюса (МСДП) и ВИН [15]. Такая концепция установления земной системы координат уже не отвечала современным требованиям, и поэтому к концу 1987 года по результатам реализации проекта MERIT были разработаны новые концепции земных и небесных систем координат. Также было рекомендовано организовать Международную службу вращения Земли, на которую возлагались функции по установлению и поддержанию Международной земной системы координат (*англ.* International Terrestrial Reference System, ITRS), Международной небесной системы координат

-
- 31 Lundquist C.A. Evolution of optical satellite tracking. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019_Lundquist_presentation.pdf (дата обращения: 16.04.2025).
- 32 Спутник «Циклон» — пионер космической навигации // Вестник ГЛОНАСС. 2012. 16 ноября. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/~E5Kcj> (дата обращения: 16.04.2025).
- 33 История развития ГНСС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/history.php> (дата обращения: 16.04.2025).
- 34 Wilkins G.A., Mueller I.I. Joint summary report of the IAU/IUGG working groups on the rotation of the Earth and the terrestrial reference system // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 771–788.
- 35 Wilkins G.A. A note on the origin, objectives and programme of Project Merit // Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics. Astrophysics and Space Science Library / E.M. Gaposchkin, B. Kołaczek (eds). Dordrecht: Springer, 1981. Vol. 86. P. 275–276.
- 36 Boucher C., Altamimi Z. Status of the realization of the ВИТ Terrestrial System // The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics. 1988. Vol. 128. P. 107–114.
- 37 Wilkins G.A. The background to the MERIT/COTES recommendations on the terrestrial and celestial reference systems // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 81–84.

(англ. International Celestial Reference System) и определению параметров вращения Земли (ПВЗ)³⁸. С января 1988 года МСВЗ начала свою работу [14], фактически заменив МСДП и взяв на себя функции отдела наблюдения за вращением Земли ВИН³⁹.

В 1989 году МСВЗ представила предварительную реализацию своей земной системы координат ITRF-0, включающую в себя координаты 34 пунктов, основой которой послужило предыдущее решение ВИН — BTS87. Несколько позднее была представлена первая версия ITRS — ITRF88, созданная уже с опорой на ITRF-0 и реализованная координатами 96 пунктов^{40,41}. После ITRF88 и вплоть до 1997 года⁴² решения МСВЗ выходили практически ежегодно. Первые версии ITRF расшифровывались как Земная отсчетная основа МСВЗ (англ. IERS Terrestrial Reference Frame), а ITRS — как Земная система координат МСВЗ (англ. IERS Terrestrial Reference System).

Решение ITRF-0 было получено по измерениям только двух техник (РСДБ и ЛЛС), ITRF88 — трех (в дополнение использовали ЛЛЛ⁴⁰), а ITRF91 — уже четырех (начали включать GPS-измерения) [16]. Начиная с решения ITRF93, данные ЛЛЛ, как правило, уже не использовались⁴³, исключением стало решение ITRF2000⁴⁴. При выводе ITRF94 впервые были использованы доплеровские измерения системы DORIS⁴⁵, которая была развернута в 1986–1990 годах под руководством CNES для целей высокоточного определения орбит космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и насчитывала 32 наземных радиомаяка⁴⁶.

Повышению точности определения ЗСК в 1980-х годах способствовало также совершенствование методов космической геодезии в рамках американского проекта NASA по изучению динамики земной коры (англ. Crustal Dynamics Project, CDP) и европейского проекта WEGENER [17].

Проект CDP, запущенный NASA в 1979 году, имел целью изучение методами космической геодезии тектоники плит и динамики вращения Земли⁴⁷. За время существования проекта (до декабря 1991 года) вместе с США в нем приняли участие представители 25 стран⁴⁷. Реализация этого проекта послужила стимулом развития КОС и РСДБ-наблюдений, а погрешности этих наблюдений достигли миллиметрового уровня (в начале проекта погрешность измерений этих систем превышала 10 см). До 1985 года в тесном контакте с программой CDP осуществлялась программа по развитию и исследованию применения системы GPS. На пунктах РСДБ, задействованных в CDP, тестировались первые GPS-приемники, подтвердившие ожидаемую производительность навигационной системы (согласие полученных результатов с РСДБ оценивалось

38 Wilkins G.A., Mueller I.I. Joint summary report of the IAU/IUGG working groups on the rotation of the Earth and the terrestrial reference system // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 771–788.

39 History of the IERS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iers.org/IERS/EN/Organization/About/History/history.html> (дата обращения: 16.04.2025).

40 Boucher C., Altamimi Z. Evolution of the realizations of the Terrestrial Reference System done by the BIN and IERS (1984–1988) // IERS Technical Note. No. 4. P. 1–112.

41 McCarthy D.D. IERS Conventions 1992 // IERS Technical Note. No. 21. P. 1–95.

42 Keenan R., Blick G. Reference Frames in Practice Manual. FIG Publication No 64. 2nd ed. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fig.net/resources/publications/figpub/pub64_2ed/Figpub64_2ed.pdf (дата обращения: 16.04.2025).

43 ITRF93 solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://datacenter.iers.org/products/reference-systems/terrestrial/itrf/old/itrf93.ssc> (дата обращения: 16.04.2025).

44 ITRF2000 solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2000> (дата обращения: 16.04.2025).

45 ITRF94 solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itrf.ign.fr/ftp/pub/itrf/itrf94/ITRF94.REPORT>. (дата обращения: 16.04.2025).

46 About International DORIS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ids-doris.org/ids/organization/about-ids.html> (дата обращения: 16.04.2025).

47 Bosworth J.M., Coates R.J., Fischetti T.L. The development of NASA's crustal dynamics project // Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. 1993. Vol. 25. P. 1–20.

в пределах погрешности GPS — 1–2 см)⁴⁸. После 1985 года работы по взаимному сравнению GPS и РСДБ продолжились с целью постепенного перехода от РСДБ-наблюдений деформаций земной коры к их GPS-мониторингу⁴⁸. В результате программы CDP была создана база данных CDDIS (*англ.* Crustal Dynamics Data Information System)⁴⁸, которая содержит данные и продукты, собираемые глобальными геодезическими сетями (ГНСС, ЛЛС, РСДБ, DORIS), и архив продуктов МСВЗ. Таким образом, проект CDP внес большой вклад в деятельность МСВЗ по созданию и поддержанию ЗСК сантиметровой точности, основанной на наблюдениях РСДБ, ЛЛЛ и ЛЛС, и небесной системы координат, основанной на РСДБ-наблюдениях, с погрешностью несколько миллисекунд дуги⁴⁹ [17].

В Европе аналогом проекта CDP стала деятельность группы WEGENER (*англ.* Working Group of European Geoscientists for the Establishment of Networks for Earth-science Research), созданной в 1981 году для изучения геодинамики и гравитационного поля Земли методами космической геодезии, а также создания геодезических сетей в тектонически активных областях [18]. К 1998 году в ней участвовали профильные учреждения из 35 стран⁵⁰. В 2013 году сообщество WEGENER пересмотрело свою миссию и, сохранив аббревиатуру, переориентировалось на развитие всемирной геодезической сети для исследования землетрясений и опасных экологических явлений [18]. Вклад проекта WEGENER, существующего уже более 40 лет, в развитие систем координат заключается в совершенствовании наземной геодезической инфраструктуры и предоставлении высокоточных координат и скоростей станций наблюдений.

Положительный опыт применения GPS-наблюдений для целей геодезии и геодинамики побудили МАГ в 1992 году создать глобальную сеть из 42 GPS-станций. А уже в 1994 году МАГ создает Международную службу GPS для целей геодинамики, которая в конце 1990-х годов меняет название на Международную службу GPS. В 2005 году с развитием системы ГЛОНАСС вновь происходит ее переименование на Международную службу ГНСС IGS (*англ.* International GNSS Service) [19]. В настоящее время сеть IGS насчитывает 528 постоянно действующих станций⁵¹. Такая плотность сети совместно с высокоточными результатами обработки измерительных данных — продуктами IGS — обеспечивает легкий и строгий доступ к ОГСК пользователям по всему миру [17]. По схожим мотивам, нацеленным на объединение сообщества поставщиков измерений и их потребителей, на рубеже тысячелетий (1998–2003) учреждаются Международная служба лазерной дальнометрии (*англ.* International Laser Ranging Service, ILRS, 1998), Международная служба РСДБ (*англ.* International VLBI Service, IVS, 1999) и Международная служба DORIS (*англ.* International DORIS Service, IDS, 2003).

В 2003 году, учитывая вклад МСВЗ в создание и развитие земной и небесной систем отсчета, организация получила свое современное наименование — Международная служба вращения Земли и систем отсчета⁵², а на рубеже тысячелетий удалось создать высокоточную общеземную геоцентрическую систему координат.

Резолюциями № 1 МАГ и № 2 МСГГ, принятыми на XX Генассамблее МСГГ (Вена, 1991), согласовано предложение МСВЗ использовать ITRS в качестве единой ЗСК и рекомендовано использовать ITRS напрямую или привязывать национальные системы координаты к ней при проведении высокоточного анализа геодезической, геодинамической или океанографической информации. Решением XXIV Генассамблеи МСГГ (Перуджа, 2007) система ITRS была принята

48 Bosworth J.M., Coates R.J., Fischetti T.L. The development of NASA's crustal dynamics project // Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. 1993. Vol. 25. P. 1–20.

49 Feissel M., Bourquard D., Charlot P., et al. Earth orientation and related reference frames // Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics. 1993. Vol. 24. P. 99–111.

50 Wilson P. An Introduction to the Working group of European Geo-scientists for the Establishment of Networks for Earth-science Research (WEGENER) // Journal of Geodynamics. 1998. Vol. 25. P. 177–178.

51 IGS Network. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://network.igs.org/> (дата обращения: 16.04.2025).

52 Рыжова Л.В. Международная служба вращения Земли. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://old.bigenc.ru/physics/text/4025057> (дата обращения: 16.04.2025).

в качестве приоритетной геоцентрической системы координат для научных и технических приложений. Таким образом, Международная земная система координат ITRS — это общеземная геоцентрическая трехмерная система координат, вращающаяся вместе с Землей в ее суточном движении в пространстве, устанавливаемая и поддерживаемая МСВЗ при содействии многих стран, на территориях которых расположены станции наблюдений.

3.2 Реализации общеземной геоцентрической системы координат

3.2.1 Классификация реализаций ОГСК

Реализацией ITRS может быть любая отсчетная основа, которая содержит необходимую численную информацию, удовлетворяющую определению основных элементов ITRS (начало, ориентация осей, масштаб) и их эволюции во времени⁵³. Реализация достигается посредством определения точных координат (и скоростей) пунктов геодезической сети и может быть глобальной, региональной или локальной. Если определены только координаты пунктов, то такая реализация называется статической. При определении координат и скоростей движения пункта без рассмотрения природы сил, вызывающих данное изменение положения пункта, реализация называется кинематической. Если внешние силы все-таки рассматриваются в процессе определения решения, то такая реализация называется динамической.

Современные реализации ITRS создают путем обработки и анализа измерительных данных РСДБ, ГНСС, ЛЛС, системы DORIS, а решение может быть получено с использованием данных как одного, так и всех четырех методов наблюдений. Первичной реализацией ITRS является решение, предоставляемое МСВЗ под общим названием ITRF. Вторичной реализацией ITRS является любая другая земная система координат, имеющая нулевые значения параметров трансформирования к ITRF (7 параметров для статической реализации и 14 параметров для кинематической или динамической). Вторичные реализации выводятся на основе существующих первичной или вторичных реализаций и могут представлять собой сгущение ITRF на определенную территорию.

Вторичная реализация ITRS может быть представлена в виде системы координат, зафиксированной на земной поверхности сетью геодезических пунктов или станций с измерительными инструментами, которая может иметь глобальный, региональный или национальный охват. В первом случае речь идет о статической реализации, которая определяется только координатами станций на некоторую эпоху, а во втором рассматривается кинематическая (или динамическая) реализация, определяемая временными рядами координат станций на фиксированном временном интервале (например, суточные или недельные ряды).

Вторичная реализация ITRS может распространяться спутниковыми эфемеридами НКА, рассчитанными в земной системе координат как линейные или нелинейные функции времени. Бортовые эфемериды НКА в земной системе координат являются численным прогнозом траектории движения центра масс одного или нескольких искусственных спутников Земли, представленным в принятой земной системе координат данной ГНСС.

3.2.2 Первичная реализация

ITRF представляет собой набор координат и скоростей пунктов глобальной сети и служит основой для современных региональных и национальных систем отсчета. Точность решений ITRF последовательно улучшалась и в настоящий момент характеризуется погрешностями координат пунктов на уровне первых единиц миллиметров. Скорости станций ITRF описываются относительно

53 ISO-19161-1-2020. Geographic information – Geodetic references. Part 1: The international terrestrial reference system (ITRS) / International Organization for Standardization, 2020. 16 p.

условия отсутствия вращения сети (No-Net-Rotation), при котором моменты импульса всех глобальных тектонических плит суммарно равны нулю. ITRF2005, 2008, 2014 и 2020 построены на наблюдениях РСДБ, ГНСС, ЛЛС и DORIS. Период обновления последних версий ITRF составляет 6 лет.

В первых реализациях ITRF88, 89 и 90 глобальное поле скоростей не определялось, а для описания движения пунктов была рекомендована⁵⁴ модель AM0-2. Начиная с ITRF91, совместно с координатами пунктов стали оценивать собственное поле скоростей [16]. Для ITRF91 – ITRF2008 характерна линейная модель движения пунктов, учитывающая только среднегодовые скорости, как это рекомендовано МСВЗ. Такой подход не учитывает некоторые факторы, необходимые для корректного описания движения станций, и, соответственно, правильного вычисления ее координат на требуемую эпоху. Поэтому в ITRF2014 впервые был применен измененный подход к моделированию движения геодезических пунктов [20]. Нововведения коснулись учета нелинейных составляющих движения, выраженных в годовых и полугодовых периодических членах, а также учета постсейсмической деформации, возникающей во временных рядах координат из-за деформации земной коры после землетрясения. Моделирование периодических составляющих движения станции осуществлялось путем добавления к комбинированной модели соответствующих параметров (коэффициентов) синусоидальных и косинусоидальных функций, в то время как постсейсмические деформации учитывались до объединения решений путем применения параметрических моделей, которые сначала были уравнены с ежедневными временными рядами координат станций IGS [20]. В ITRF2014 использовалось 4 модели постсейсмических деформаций: логарифмическая, экспоненциальная, логарифмическо-экспоненциальная и двойная экспоненциальная. В ITRF2020 была добавлена пятая модель – двойная логарифмическая [21].

В 2022 году была определена ITRF2020, в рамках которой были доработаны и получили дальнейшее развитие описанные выше новшества ITRF2014 в части моделирования нелинейного движения пунктов. Помимо координат и скоростей станций в решение ITRF2020 вошли ПВЗ и уточненные параметрические функции для точного описания нелинейных смещений станций, вызванных как сезонными явлениями, так и постсейсмической деформацией. Погрешность определения координат ее опорных пунктов не превышает 5 мм, а их стабильность составляет величину не более 0,5 мм/год [21]. В 2024 году вышла обновленная версия – ITRF2020-u2023, полученная путем добавления дополнительных измерительных данных за три года (2021,0–2024,0) к периоду данных оригинальной версии МЗСК с последующей их обработкой по аналогичному алгоритму (как в ITRF2020)⁵⁵. К настоящему времени с 1989 года выпущено 14 решений ITRF.

3.2.3 Альтернативные реализации

Геодезический исследовательский институт Мюнхенского технологического университета (*нем.* Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – Technische Universität München, DGFI-TUM) и Лаборатория реактивного движения NASA (*англ.* Jet Propulsion Laboratory, JPL) выпускают собственные, альтернативные, решения ITRS: DTRF (*англ.* DGFI-TUM Terrestrial Reference Frame) и JTRF (*англ.* JPL Terrestrial Reference Frame) соответственно. Наличие нескольких решений позволяет оценить точность различных реализаций ITRS путем их сравнения⁵⁶.

Первой альтернативной реализацией ITRS была DTRF2008, рассчитанная в 2010 году на основе тех же входных данных, что и ITRF2008. Ее отличие от исходного решения ITRF заключалось в методике комбинирования систем

54 Minster J.B., Jordan T.H. Present-day plate motions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1978. Vol. 83. P. 5331–5354.

55 IERS Message No. 517. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://datacenter.iers.org/data/2/message_517.txt (дата обращения: 16.04.2025).

56 Seitz M., Angermann D., Drewes H., et al. The DGFI realization of the International Terrestrial Reference System: the DTRF2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/ITRS_CC/DTRF2008.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (дата обращения: 16.04.2025).

нормальных уравнений⁵⁷. В 2016–2017 годах на основе ITRF2014 было получено альтернативное решение JTRF2014 [22]. При выводе JTRF2014 и ITRF2014 применялись одни и те же подходы к комбинированию, но использовалось разное программное обеспечение. В частности, для JTRF2014 применялась калмановская фильтрация. Различались также способы представления координат станций: в первом случае использовались недельные временные ряды координат станций, а во втором координаты станций рассчитывались на опорную эпоху. В 2016 году⁵⁸ было опубликовано решение DTRF2014, которое, как и ранее, было основано на собственной стратегии комбинирования⁵⁹. Альтернативными решениями ITRF2020 являются DTRF2020 (получена в 2023 году)⁶⁰ и JTRF2020, обновленная версия которой (JTRF2020-u2022⁶¹) опубликована в 2025 году. По сравнению с предыдущим решением масштаб DTRF2020 впервые определен по наблюдениям ГНСС и РСДБ, также была впервые учтена постсейсмическая деформация станций и все три компонента неприливной нагрузки⁶². В JTRF2020⁶³ (и в JTRF2020-u2022) по сравнению с JTRF2014 использовалось уже другое программное обеспечение, возможности которого позволили определить суточные координаты станций, учесть постсейсмическую деформацию и региональные корреляции в координатах станций.

3.2.4 Реализации на базе станций ГНСС

С момента своего образования Международная служба ГНСС для описания своих продуктов (эфемериды НКА ГНСС, координаты и скорости пунктов сети IGS, ПВЗ и др.) использует собственную реализацию МЗСК, которая аналогична ITRF, но необходима для обеспечения взаимосогласованности продуктов IGS и исключения потенциального ухудшения их точности вследствие прямого использования других координатных систем (например, ITRF) [23].

Реализации IGS формируются ГНСС-станциями, которые берутся из соответствующих им решений ITRF. Координаты в этих двух системах практически идентичны, однако в реализации IGS в координаты станций могут вноситься поправки, вызванные необходимостью учета актуальных калибровок установленных на станциях антенн. Перечень станций, для которых эти поправки были введены, публикуется вместе с официальным решением IGS⁶⁴. Параметры перехода между ITRF и соответствующей реализацией IGS равны нулю⁶⁵.

Первая IGS-реализация, полученная в 1994 году из решения ITRF92, включала всего 13 GPS-станций, которые были колоцированы с ЛЛС и РСДБ, еще не имела

-
- 57 Seitz M., Angermann D., Drewes H., et al. The DGFI realization of the International Terrestrial Reference System: the DTRF2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/ITRS_CC/DTRF2008.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (дата обращения: 16.04.2025).
- 58 DTRF2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dtrf.dgfi.tum.de/en/dtrf2014/> (дата обращения: 16.04.2025).
- 59 Dick W., Altamimi Z. Description and evaluation of DTRF2014, JTRF2014 and ITRF2014 // IERS Technical Note. No 40. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote40/tn40.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (дата обращения: 16.04.2025).
- 60 IERS Message No. 484. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://datacenter.iers.org/data/2/message_484.txt (дата обращения: 16.04.2025).
- 61 IERS Message No. 520. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://datacenter.iers.org/data/2/message_520.txt (дата обращения: 16.04.2025).
- 62 DTRF2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dtrf.dgfi.tum.de/en/dtrf2020/> (дата обращения: 16.04.2025).
- 63 JTRF2020 Solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.jpl.nasa.gov/site/jsgt/jtrf/solutions/jtrf2020/> (дата обращения: 16.04.2025).
- 64 IGS MAIL No. 8238. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2022/008234.html> (дата обращения: 16.04.2025); IGS MAIL No. 7399. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2016/001233.html> (дата обращения: 16.04.2025).
- 65 Keenan R., Blick G. Reference Frames in Practice Manual. FIG Publication No 64. 2nd ed. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fig.net/resources/publications/figpub/pub64_2ed/figpub64_2ed.pdf (дата обращения: 16.04.2025).

собственного наименования. Начиная с 2000-х годов, спустя некоторое время после выпуска основной версии IGS-реализации, базирующейся на актуальном решении ITRF, Международная служба ГНСС стала обновлять свое решение, добавляя в него новые данные за более длительный период времени и (или) новые станции из своей сети. Таким образом, на сегодняшний день имеется 16 IGS-реализаций, последняя из которых (IGS20) была получена в 2022 году на основе 332 ГНСС-станций⁶⁶. С февраля 2025 года действует обновленная версия этой реализации — IGb20, полученная из последнего официального решения ITRF — ITRF2020-и2023. В нее вошли координаты и скорости 343 пунктов IGS (332, входящих в предыдущее решение IGS20, и 11 новых)⁶⁷.

3.2.5 Орбитальные реализации

Для высокоточного определения орбит НКА в каждой группировке ГНСС необходимо установить и поддерживать собственную ОГСК. Для этого координаты станций наземного комплекса управления (НКУ) каждой ГНСС должны быть заданы в этой системе. GPS распространяет World Geodetic System 1984 (WGS 84), ГЛОНАСС — «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11), Galileo — Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF), BDS — BeiDou Coordinate System (BDCS). Краткое описание этих систем приводится в [24]. Вычисленные орбиты НКА затем передаются потребителям посредством навигационного сообщения ГНСС, что позволяет определять положение потребителя в соответствии с этими орбитами.

В целях обеспечения совместимости и взаимодополняемости ГНСС их собственные ОГСК в настоящее время согласованы с первичными реализациями ITRS через различные версии ITRF. Все эти системы согласованы с ITRF на уровне 1 см, что достигается за счет совместного уравнивания станций мониторинга НКУ и постоянно действующих пунктов сети IGS, поэтому они имеют практически нулевые параметры связи по отношению к ITRF [24]. По различным оценкам [2, 24], точность согласования орбитальных реализаций ОГСК по отношению к ITRF характеризуется погрешностями 1–4 см для WGS 84, 3–4 см для BDCS, 2–5 см для GTRF и около 10 см для ПЗ-90.11.

3.2.6 Национальные и региональные системы координат

Развитие ГНСС позволило геодезическим и картографическим организациям по всему миру постепенно отказываться от классических горизонтальных картографических систем координат (геодезических исходных дат), таких как Европейская система координат 1950 года, Токийская система координат, Североамериканская система координат 1927 года, Система координат 1942 года, и от сотен других классических горизонтальных картографических систем координат, разработанных во многих странах для собственных нужд [2]. Им на смену пришли национальные и региональные пространственные прямоугольные системы координат, основанные на ГНСС-измерениях: национальная система координат США — North American Datum of 1983 (NAD 83), государственная система координат РФ для обеспечения геодезических и картографических работ — Геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011); European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89), используемая в Евросоюзе, Chinese Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000), применяемая в КНР. Все они выводились с опорой на ITRF, за исключением NAD 83, которая была согласована с ITRF только в последних реализациях. Фактически такие системы можно рассматривать как сгущение МЗСК на территории соответствующих стран или регионов.

⁶⁶ IGS Reference Frame. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://igs.org/wg/reference-frame/#documents> (дата обращения: 16.04.2025).

⁶⁷ IGS MAIL No. 8543. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2024/008539.html> (дата обращения: 16.04.2025).

3.3 Развитие общеземной геоцентрической системы координат

С развитием космических геодезических систем, позволяющих выполнять измерения в глобальном масштабе, стало возможным построение чисто геометрической глобальной системы координат, начало которой находится в центре масс Земли, ось абсцисс направлена в Гринвичский меридиан по экватору, ось аппликата совпадает с осью вращения Земли, а ось ординат дополняет систему до правой. С одной стороны, использование единой общеземной декартовой системы координат значительно упростило решение целого ряда как прикладных, так и научных задач, а с другой — растущие требования к точности побуждали установить систему координат, учитывающую эндогенные и экзогенные деформации в теле Земли [25].

3.3.1 Глобальная система геодезических наблюдений

Возникшая на рубеже XX–XXI веков необходимость мониторинга пространственно-временной изменчивости Земли побудила научное сообщество приступить к созданию Глобальной системы геодезических наблюдений (*англ.* Global Geodetic Observing System, GGOS), анонсированной в 2003 году на Генассамблее МСГГ (Саппоро, Япония) и уже в 2005 году вошедшей в фазу реализации. Система GGOS — это проект МАГ для наблюдения за геодезическими параметрами и их вариациями во времени, для реализации которого требуется точная и стабильная система координат, жестко связанная с Землей. Погрешность установления такой системы координат должна быть не хуже 1 мм, а ее стабильность — не хуже 0,1 мм/год. Для достижения этих требований необходимы согласованные и открытые геодезические наблюдения, объединенные в рамках единой системы. Система наблюдений GGOS состоит из таких основных элементов, как:

- 1) инструменты для наблюдений;
- 2) инфраструктура сбора, передачи данных и обмена ими;
- 3) центры анализа, комбинирования и моделирования;
- 4) портал для доступа к создаваемым продуктам данных [26].

В 2023 году был опубликован Стратегический план GGOS, где были обозначены четыре основные перспективные цели глобальной системы наблюдений на будущее десятилетие (до 2034 года)⁶⁸:

- 5) продемонстрировать пользу геодезии для общества;
- 6) внести вклад в развитие Глобальной геодезической системы координат (*англ.* Global Geodetic Reference System, GGRS);
- 7) развивать измерительную инфраструктуру, методы анализа данных и экспертизу геодезических методов;
- 8) задействовать все геодезические методы для проведения комплексных геодезических исследований и технологических разработок.

Для достижения этих целей и выполнения задач координационный офис и руководящий состав GGOS разрабатывают план работ на 4 года вперед. Текущий план рассчитан до 2027 года.

3.3.2 Глобальная геодезическая система координат и ее реализация

Концепция GGOS задала требования к точности и стабильности ОГСК, которые могут быть достигнуты за счет построения качественно новой Глобальной геодезической системы координат GGRS и ее реализации — GGRF (*англ.* Global Geodetic Reference Frame) (в настоящий момент эти требования превышены в пять раз [21]). GGRS и GGRF были задуманы Комитетом экспертов ООН по глобальному управлению геопространственной информацией (*англ.* UN Committee

⁶⁸ Sanchez L., Miyahara B., Craddock A., et al. GGOS Strategic Plan 2024–2034. Geodesy for Science and Society. Vienna: GGOS Coordinating Office, Federal Office of Metrology and Surveying, 2023. 33 p.

of Experts on Global Geospatial Information Management, UN-GGIM) и реализуются МАГ⁶⁹. GGRF была принята резолюцией ООН A/RES/69/266 «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» на 69-й сессии Генеральной ассамблеи ООН в 2015 году.

GGRS имеет наземную и небесную составляющие. Наземный компонент состоит из общих теоретических концепций описания пространственного положения точек на земной поверхности. Они, в свою очередь, описывают как геометрические характеристики этих точек (координаты в системе ITRS), так и их физические атрибуты (геопотенциал, физическая высота и сила тяжести). Основой небесного компонента выступает ICRS. Для их связи используются ПВЗ⁶⁹.

GGRF представляет собой комплексную геодезическую отсчетную основу, с помощью которой пользователи могут определять и выражать свое местоположение на Земле, а также оценивать изменения Земли в пространстве и времени. В настоящее время в GGRF входят: ITRF, Международная небесная отсчетная основа (*англ.* International Celestial Reference Frame, ICRF) и реализации физических систем высот⁷⁰. В будущем в GGRF будут включены Международная высотная отсчетная основа (*англ.* International Height Reference Frame, IHRF) и Международная гравиметрическая отсчетная основа (*англ.* International Gravity Reference Frame, IGRF)⁶⁹. Пункты последних двух должны будут быть совмещены с фундаментальными обсерваториями для требуемой колокации методов измерений. Инфраструктурным базисом GGRF будет выступать многоуровневая система GGOS⁶⁹.

GGRS и GGRF будут использоваться для сбора, управления и использования национальной геопространственной информации и глобального мониторинга Земли⁷¹. Данные, полученные в GGRS и GGRF, будут востребованы в координатно-временном и навигационном обеспечении, геодезии, картографии и других науках о Земле. Кроме того, эти системы будут вносить вклад в социально-экономическое развитие общества и обеспечение его защиты от стихийных бедствий и природных катаклизмов⁷¹.

3.3.3 Космический проект GENESIS

Следующим шагом, направленным на качественное развитие ОГСК, должен стать инновационный проект Европейского космического агентства GENESIS, суть которого состоит в сочетании и колокации четырех методов космической геодезии (ГНСС, ЛЛС, РСДБ и DORIS) на одной спутниковой платформе в космическом пространстве [27]. GENESIS будет представлять собой динамическую космическую геодезическую обсерваторию, несущую на себе геодезические приборы (ГНСС, ЛЛС, РСДБ и DORIS), привязанные друг к другу с помощью тщательно выверенных пространственных связей, и движущуюся на средневысокой орбите [27] (высотой 6000 км и наклоном 95°)⁷². Планируемая масса космического аппарата GENESIS будет составлять около 400 кг.

Колокация измерительных методов в космосе должна устранить несоответствия и погрешности различных геодезических методов для достижения целей точности и стабильности МЗСК, одобренных различными международными организациями и научным сообществом [27]. Такие погрешности характерны в большей степени для наземных пунктов колокации. Так, при выводе ITRF2020 более чем 50 % измеренных пространственных связей на них имели

69 Description of the Global Geodetic Reference Frame. IAG Executive Committee, 2016. 5 p.

70 UN-GGIM Knowledge Base. GGRF. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ggim.un.org/knowledgebase/knowledgebasecategory37.aspx> (дата обращения: 16.04.2025).

71 UN GGIM Global Geodetic Reference Frame. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/GGRF_Wksp/08_Johnston_2019_UN-GGIM_GGRF.pdf (дата обращения: 16.04.2025).

72 Gidlund S., Enderle W., Navarro V., et al. GENESIS – A Multi-Technique Geodetic Observatory in Space // 64th Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee. Baltimore, USA, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2024/enderle.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).

погрешности, превышающие 5 мм при допустимой величине⁷³ в 1 мм. Кроме того, сами пункты колокации расположены на Земле неравномерно, а их количество немногочисленно и редко обновляется. Но при этом пункты колокации на Земле все равно будут играть важную роль в рассматриваемой миссии и служить для нее вспомогательной наземной инфраструктурой [27]. Выполнение поставленных целей по точности и стабильности ITRF является одной из основных задач всей миссии [27].

Другой важной задачей GENESIS является улучшение связи МЗСК с ICRF благодаря более стабильным ПБЗ. В частности, это позволит впервые связать орбитальные реализации ITRF и ICRF^{74,75}. Ожидается, что помимо геодезии результаты миссии GENESIS будут востребованы и в других областях: навигации, метрологии, геодинамике и других науках о Земле [27]. В настоящий момент миссия находится на этапе обсуждения предварительного проекта⁷⁶, а ее старт планируется^{74,76} на 2028 год. Предполагается, что срок ее функционирования составит порядка двух лет с возможностью продления⁷⁶.

4 Выводы

С развитием космических геодезических систем, позволяющих выполнять измерения в глобальном масштабе, был организован ряд международных наблюдательных кампаний, в результате которых стало возможным определить координаты станций наблюдений в единой ОГСК. Усилиями Международного бюро времени, а впоследствии МСВЗ была установлена Международная земная система координат. Появление глобальных навигационных спутниковых систем второго поколения — GPS и ГЛОНАСС — сыграло ключевую роль как в развитии, так и в распространении МЗСК. К рубежу тысячелетий удалось установить МЗСК с погрешностью определения координат пунктов на уровне первых единиц сантиметров, а через 15 лет все ГНСС начали ее распространять через свои бортовые эфемериды с погрешностью менее 10 см. Появление ГНСС-технологий позволило национальным картографо-геодезическим службам постепенно переходить от классических горизонтальных систем к пространственной прямоугольной системе координат. Установление чисто геометрической ОГСК значительно упростило решение целого ряда прикладных и научных задач, но растущие требования к точности побудили развивать ОГСК для учета эндогенных и экзогенных деформаций в теле Земли. Необходимость мониторинга пространственно-временной изменчивости послужила драйвером создания Глобальной системы геодезических наблюдений, требующей построения качественно новой Глобальной геодезической системы координат повышенной точности и стабильности. Колокация нескольких методов космической геодезии в космосе в рамках запуска спутника GENESIS также должна продемонстрировать качественное улучшение точностных характеристик МЗСК.

73 Ventura-Travaset J., Enderle W. GENESIS: Collocation in space of four Geodetic // 16th Meeting of the International Committee on GNSS. Abu-Dhabi, UAE, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2022/ICG16/wgd-07.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).

74 Gidlund S., Enderle W., Navarro V., et al. GENESIS – A Multi-Technique Geodetic Observatory in Space // 64th Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee. Baltimore, USA, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2024/enderle.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).

75 Enderle W., Schoenemann E., Springer T., et al. ESA's GENESIS Mission – At the foundation of Navigation // 17th Meeting of the International Committee on GNSS. Madrid, Spain, 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG-17/icg17_wgd_02_04.pdf (дата обращения: 16.04.2025).

76 Gidlund S., Fusco G., Waller P., et al. Overview of Genesis – an ESA mission at the Foundation of Navigation // EGU General Assembly. Vienna, Austria, 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU25/EGU25-15776.html> (дата обращения: 16.04.2025).

В настоящее время ОГСК базируется на большом количестве постоянно действующих наземных станций ГНСС, ЛЛС, РСДБ и DORIS, а ее установление обеспечивается многоуровневой обработкой разнородной измерительной информации. Поддержание стабильности ОГСК достигается за счет полного учета годовых скоростей движения станций, а распространение ОГСК для большинства потребителей реализуется сигналами ГНСС. Перспективы развития ОГСК связаны с установлением качественно новой общеземной геодезической системы координат, включающей геометрическую и физическую отсчетные основы; с запуском спутника GENESIS, который будет реализовывать принцип колокации нескольких типов измерений в космосе; с достижением беспрецедентного миллиметрового уровня точности в определении координат и скоростей опорных пунктов, который задан в проекте GGOS.

Проведенный анализ показал, что развитие методов наблюдений и совершенствование геодезической инфраструктуры как наземного, так и космического базирования позволяет уже сегодня определять координаты опорных пунктов с погрешностью не хуже 5 мм. Это было бы невозможным без международной кооперации большого числа стран-участниц для реализации вышеописанных наблюдательных кампаний, международных ассоциаций и союзов, космических программ и иных проектов в области наук о Земле. В то же время каждое государство, имея национальные интересы, развивает с опорой на международные ресурсы собственную, независимую геодезическую инфраструктуру, от качества которой будет зависеть точность координатных определений. Существующий на сегодняшний день потенциал позволяет России самостоятельно решать вопросы координатного обеспечения на должном уровне в соответствии с национальными приоритетами, а также принимать полноправное участие в международных программах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование частично выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FSFE-2023-0005 «Фундаментальные и поисковые исследования путей повышения эффективности комплексного использования разнородных пространственных данных в интересах ускорения цифровой трансформации экономики и обеспечения устойчивого развития территорий Российской Федерации».

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Boucher C., Altamimi Z. ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters // *Journal of Geodesy*. 2001. Vol. 75. P. 613–619. DOI:10.1007/s001900100208.
2. Malys S., Solomon R., Drotar J., et al. Compatibility of Terrestrial Reference Frames used in GNSS broadcast messages during an 8 week period of 2019 // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 67. No. 2. P. 834–844. DOI:10.1016/j.asr.2020.11.029.
3. Горобец В.П., Демьянов Г.В., Майоров А.Н. и др. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат // *Геопрофи*. 2013. № 6. С. 4–9.
4. Непоклонов В.Б., Гусев И.В., Вшивкова О.В. и др. Перспективы использования российской космической геодезической системы в научной и социально-экономической сфере // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2023. Т. 67. № 4. С. 6–25. DOI:10.30533/GiA-2023-016.
5. Кузин С.П. Станции колокации в космической геодезии и требования к ним // *Научные труды Института астрономии РАН*. 2022. Т. 7. № 4. С. 233–236. DOI:10.51194/INASAN.2022.7.4.002.
6. Кузин С.П. Современное состояние основных российских спутниковых геодезических сетей и перспективы их развития // *Научные труды Института астрономии РАН*. 2022. Т. 7. № 3. С. 208–211. DOI:10.51194/INASAN.2022.7.3.004.
7. Pearlman M., Brachet G., Lefebvre M., et al. The Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) and the Centre National d'Études Spatiales (CNES): contributions to the international laser ranging network // *Journal of Geodesy*. 2019. Vol. 93. P. 869–875. DOI:10.1007/s00190-018-1209-0.
8. Воронов Л.В. Космическая геодезия на службе обороны страны // 70 лет 29 Научно-исследовательскому институту Министерства обороны Российской Федерации / под ред. Н.И. Конона. М.: 29 НИИ МО РФ, 2006. С. 41–44.

9. Зуева А.И., Рогозин В.П. Космическая геодезия на рубеже тысячелетий // 70 лет 29 Научно-исследовательскому институту Министерства обороны Российской Федерации / под ред. Н.И. Конона. М.: 29 НИИ МО РФ, 2006. С. 127–133.
10. Козлов С.В., Зуева А.Н., Новиков Е.В., Плешаков Д.И. Итоги модернизации и перспективы развития системы геодезических параметров ПЗ-90 в целях повышения точности геодезического обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2015. № 35. С. 11–16.
11. Barlier F., Lefebvre M. A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences // The Century of Space Science / Bleeker J.A.M., Geiss J., Huber M.C.E. (eds.). Dordrecht: Springer, 2001. P. 1623–1651.
12. Матвеев Л.И. История РСДБ — становление и развитие // Сообщения Института прикладной астрономии РАН. СПб., 2007. № 176. 35 с.
13. Повалыев Е., Хуторной С. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Часть 1 // Chip News. Инженерная микроэлектроника. 2001. № 10. С. 48–55.
14. Wilkins G.A. Project MERIT and the formation of the International Earth Rotation Service // International Astronomical Union Colloquium. 2000. No. 178. P. 187–200. DOI:10.1017/S0252921100061339.
15. Boucher C. Geodetic Reference Frames: 40 Years of Technological Progress and of International Cooperation: 1970–2010 // Reference Frames for Applications in Geosciences. International Association of Geodesy Symposia. Altamimi Z., Collilieux X. (eds.). Heidelberg: Springer, 2013. Vol. 138. P. 1–4.
16. Bosy J. Global, regional and national geodetic reference frames for geodesy and geodynamics // Pure and Applied Geophysics. 2014. Vol. 171. No. 6. P. 783–808. DOI:10.1007/s00024-013-0676-8.
17. Pearlman M., Altamimi Z., Beck N., et al. Global Geodetic Observing System – considerations for the geodetic network infrastructure // Geomatica. 2006. Vol. 60. No. 2. P. 193–204.
18. Ozener H., Zerbini S., Bastos L., et al. WEGENER: World earthquake GEodesy network for environmental hazard research // Journal of Geodynamics. 2013. Vol. 67. P. 2–12. DOI:10.1016/j.jog.2012.12.005.
19. Moore A.W. The International GNSS Service: Any questions? // GPS World. 2007. No. 1. P. 58–64.
20. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., et al. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non-linear station motions: ITRF2014 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. Vol. 121. P. 6109–6131. DOI:10.1002/2016JB013098.
21. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // Journal of Geodesy. 2023. Vol. 97. P. 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
22. Abbondanza C., Chin T.M., Gross R.S., et al. JTRF2014, the JPL Kalman filter and smoother realization of the International Terrestrial Reference System // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. Vol. 122. No. 10. P. 8474–8510. DOI:10.1002/2017JB014360.
23. Ray J., Dong D., Altamimi Z. IGS reference frames: status and future improvements // GPS Solutions. 2004. Vol. 8. P. 251–266. DOI:10.1007/s10291-004-0110-x.
24. Гусев И.В., Голубицкий А.М. Оценка согласованности орбитальных реализаций систем координат, распространяемых глобальными навигационными спутниковыми системами, с Международной земной системой координат ITRF за 2020–2023 гг. // Геодезия и картография. 2024. № 2. С. 5164. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1004-2-51-64.
25. Herring T.A. Overview // Treatise on Geophysics. Vol. 3: Geodesy / Schubert G., Herring T.A. (eds.). Cambridge: Elsevier, 2007. P. 1–10.
26. Plag H.P., Pearlman M. Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Berlin: Springer, 2009. 367 p.
27. Delva P., Altamimi Z., Blazquez A., et al. GENESIS: co-location of geodetic techniques in space // Earth, Planets and Space. 2023. Vol. 75. P. 5. DOI:10.1186/s40623-022-01752-w.

АВТОРЫ **Гусев Игорь Витальевич**

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
Королёв, Россия

Информационно-аналитический центр координатно-временного
и навигационного обеспечения

канд. техн. наук

 0000-0002-5843-2688

Голубицкий Андрей Михайлович

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
Королёв, Россия

Информационно-аналитический центр координатно-временного
и навигационного обеспечения

 0000-0001-7337-2348

Непклонов Виктор Борисович

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия;

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,

Москва, Россия

кафедра высшей геодезии, геодезический факультет

д-р техн. наук

 0000-0003-1241-1117

Поступила 15.05.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликована 30.06.2025.



Research on the development issues of coordinate support

Igor V. Gusev¹, Andrey M. Golubitskiy¹, Viktor B. Nepoklonov^{2,3}✉

¹ Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Russia

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ vbnep@miigaik.ru

CITATION Gusev IV, Golubitskiy AM, Nepoklonov VB. Research on the development issues of coordinate support. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 22–43. DOI:10.30533/GiA-2025-049.

KEYWORDS space geodetic complex, coordinate support, geocentric reference system, GNSS, IERS, GENESIS, GGOS, GGRF, ITRF, ITRS

ABSTRACT The goal of the work is to identify promising areas for the development of coordinate support as a basis for sustainable socio-economic development. From the standpoint of systems analysis, the technological aspects of establishing, maintaining, developing and distributing the global geocentric reference system (GGCRS) are studied. Various GGCRS realizations are considered, including primary realizations based on the ITRF network, alternative solutions obtained by leading foreign centers, realizations based on the International GNSS Service stations and realizations based on the orbital approach. The conducted analysis took into account the state of affairs in the field of domestic space geodesy and its use in the interests of coordinate support. Among the main achievements noted is the fact that during this time in the USSR and the Russian Federation, using the space geodetic complexes “Geoid” and “GEO-IK”, the GGCRS “Parametry Zemli 1977, 1985 and 1990” were created. Today, the prospects for the development of GGCRS are associated with the establishment of a qualitatively new global geodetic reference system, including geometric and physical reference frames; the GENESIS satellite launch, which will implement the principle of several measurements types colocation in space; the achievement of an unprecedented millimeter level of accuracy in determining the coordinates and velocities of reference points, which is specified in the GGOS project.

ACKNOWLEDGEMENTS The research was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment FSFE-2023-0005 “Fundamental and exploratory research on ways to improve the efficiency of integrated use of heterogeneous spatial data to accelerate the digital transformation of the economy and ensure sustainable development of the territories of the Russian Federation”.

- REFERENCES**
1. Boucher C, Altamimi Z. ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters. *Journal of Geodesy*. 2001;75: 613–619. DOI:10.1007/s001900100208.
 2. Malys S, Solomon R, Drotar J, et al. Compatibility of Terrestrial Reference Frames used in GNSS broadcast messages during an 8 week period of 2019. *Advances in Space Research*. 2020;67(2): 834–844. DOI:10.1016/j.asr.2020.11.029.
 3. Gorobets VP, Dem'yanov GV, Maiorov AN, et al. Sovremennoe sostoyanie i napravleniya razvitiya geodezicheskogo obespecheniya RF. Sistemy koordinat [Current state and directions of development of geodetic support of the Russian Federation. Coordinate systems]. *Geoprofi*. 2013;(6): 4–9. (In Russian).
 4. Nepoklonov VB, Gusev IV, Vshivkova OV, et al. Perspektivy ispol'zovaniya rossiiskoi kosmicheskoi geodezicheskoi sistemy v nauchnoi i sotsial'no-ekonomicheskoi sfere [Use of the russian space geodetic system for science and social and economic sphere]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2023;67(4): 6–25. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-016.
 5. Kuzin SP. Stantsii kolokatsii v kosmicheskoi geodezii i trebovaniya k nim [Collocation stations in space geodesy and their requirements]. *INASAN Science Reports*. 2022;7(4): 233–236. (In Russian). DOI:10.51194/INASAN.2022.7.4.002.
 6. Kuzin SP. Sovremennoe sostoyanie osnovnykh rossiiskikh sputnikovyykh geodezicheskikh setei i perspektivy ikh razvitiya [The current status of the main Russian satellite geodetic networks and prospects of their development]. *INASAN Science Reports*. 2022;7(3): 208–211. (In Russian). DOI:10.51194/INASAN.2022.7.3.004.
 7. Pearlman M, Brachet G, Lefebvre M, et al. The Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) and the Centre National d'Études Spatiales (CNES): contributions to the international laser ranging network. *Journal of Geodesy*. 2019;93: 869–875. DOI:10.1007/s00190-018-1209-0.
 8. Voronov LV. Kosmicheskaya geodeziya na sluzhbe oborony strany [Space geodesy in the service of national defense]. *70 let 29 Nauchno-issledovatel'skomu institutu Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii*. Konon NI. (ed.). Moscow: 29 NII MO RF; 2006. P. 41–44. (In Russian).
 9. Zueva AI, Rogozin VP. Kosmicheskaya geodeziya na rubezhe tysyacheletii [Space geodesy at the turn of the millenium]. *70 let 29 Nauchno-issledovatel'skomu institutu Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii*. Konon NI. (ed.). Moscow: 29 NII MO RF; 2006. P. 127–133. (In Russian).
 10. Kozlov SV, Zueva AN, Novikov EV, Pleshakov DI. Itogi modernizatsii i perspektivy razvitiya sistemy geodezicheskikh parametrov PZ-90 v tselyakh povysheniya tochnosti geodezicheskogo obespecheniya global'noi navigatsionnoi sputnikovoi sistemy GLONASS [The Results and Prospects of the PZ-90 Development for a Higher Precision of the GLONASS Geodetic Service]. *Transactions of IAA RAS*. 2015;35: 11–16. (In Russian).
 11. Barlier F, Lefebvre M. A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences. *The Century of Space Science*. Bleeker JAM., Geiss J, Huber MCE. (eds.) Dordrecht: Springer; 2001: 1623–1651.
 12. Matveenko LI. Istoriya RSDB – Stanovlenie i razvitie [The VLBI history: coming into being and developing]. *IAARAS Messages*. Saint Petersburg, 2007;176. 35 p. (In Russian).
 13. Povalyaev E, Khutornoi S. Sistemy sputnikovoi navigatsii GLONASS i GPS. Chast' 1 [GLONASS and GPS satellite navigation systems. Part 1]. *Chip News. Engineering microelectronics*. 2001;10: 48–55. (In Russian).
 14. Wilkins GA. Project MERIT and the formation of the International Earth Rotation Service. *International Astronomical Union Colloquium*. 2000;178: 187–200. DOI:10.1017/S0252921100061339.
 15. Boucher C. Geodetic Reference Frames: 40 Years of Technological Progress and of International Cooperation: 1970–2010. *Reference Frames for Applications in Geosciences. International Association of Geodesy Symposia*. Altamimi Z, Collilieux X. (eds.) Heidelberg: Springer; 2013(138): 1–4.
 16. Bosy J. Global, regional and national geodetic reference frames for geodesy and geodynamics. *Pure and Applied Geophysics*. 2014;171(6): 783–808. DOI:10.1007/s00024-013-0676-8.
 17. Pearlman M, Altamimi Z, Beck N, et al. Global Geodetic Observing System – considerations for the geodetic network infrastructure. *Geomatica*. 2006;60(2): 193–204.

18. Ozener H, Zerbini S, Bastos L, et al. WEGENER: World earthquake geodesy network for environmental hazard research. *Journal of Geodynamics*. 2013;67: 2–12. DOI:10.1016/j.jog.2012.12.005.
19. Moore AW. The International GNSS Service: Any questions? *GPS World*. 2007;1: 58–64.
20. Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non-linear station motions: ITRF2014. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016;121: 6109–6131. DOI:10.1002/2016JB013098.
21. Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*. 2023;975: 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
22. Abbondanza C, Chin TM, Gross RS, et al. JTRF2014, the JPL Kalman filter and smoother realization of the International Terrestrial Reference System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017;122(10): 8474–8510. DOI:10.1002/2017JB014360.
23. Ray J, Dong D, Altamimi Z. IGS reference frames: status and future improvements. *GPS Solutions*. 2004;8: 251–266. DOI:10.1007/s10291-004-0110-x.
24. Gusev IV, Golubitskii AM. Otsenka soglasovannosti orbital'nykh realizatsii sistem koordinat, rasprostranyaemykh global'nymi navigatsionnymi sputnikovymi sistemami, s Mezhdunarodnoi zemnoi sistemoi koordinat ITRF za 2020–2023 gg. [Compatibility assessment of the reference frames orbital realizations broadcasted by the global navigation satellite systems with the International terrestrial reference frame (ITRF) during 2020–2023]. *Geodesy and Cartography*. 2024;2: 51–64. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1004-2-51-64.
25. Herring TA. Overview. *Treatise on Geophysics, Volume 3: Geodesy*. Schubert G, Herring TA. (eds.) Cambridge: Elsevier; 2007: 1–10.
26. Plag HP, Pearlman M. Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Berlin: Springer; 2009. 367 p.
27. Delva P, Altamimi Z, Blazquez A, et al. GENESIS: co-location of geodetic techniques in space. *Earth, Planets and Space*. 2023;75: 5. DOI:10.1186/s40623-022-01752-w.

AUTHORS Igor V. Gusev

Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Russia
 Information and Analysis Center for Positioning Navigation and Timing
 PhD in Engineering
 0000-0002-5843-2688

Andrey M. Golubitskiy

Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Russia
 Information and Analysis Center for Positioning Navigation and Timing
 0000-0001-7337-2348

Viktor B. Nepoklonov

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
 Moscow, Russia;
 Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Higher Geodesy, Faculty of Geodesy
 Dr. of Sci. (Engineering)
 0000-0003-1241-1117

Submitted: May 15, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.